2極空気冷却タービン発電機の新系列機の開発

佐藤 昭二(さとう しょうじ)　溝上 良一(みぞかみ りょういち)　山﨑 勝(やまざき まさる)

1 まえがき

約5年前に260MVAまでの2極空気冷却タービン発電機[1]（以下，空冷機と呼ぶ）の系列化を完了し，地熱発電用をはじめ多くの空冷機を製作してきたが，IPP（独立発電事業者）の台頭，東南アジアの電力需要の増大などにより，今後特に300MVA以下の需要が多くなるものと予想される。今や空冷機は300MVAまで製作可能であり，この出力範囲は完全に空冷機の適用範囲といえる。

空冷機は水素冷却タービン発電機に比し，効率が若干劣るものの，初期投資額が低く，メンテナンスコストが安価であることから，経済的に見て明らかに有利である。この空冷機の経済的有利性をさらに進めるべく，発電機のより一層のコスト低減が望まれている。

富士電機ではこの市場要求にこたえるべく，300MVAまでの空冷機の新系列機を開発中である。この新系列開発に際しては，発電機の利用率の向上による大幅な体格縮小を計画している。この大幅な体格縮小を実現するには，多くの課題を解決しなければならない。しかしこれまではこれらの課題は，実機により少しずつ改善を試みるが，部分的なモデル実験により解決されてきた。したがって，大きな進歩を短期間に行うことは困難であった。

しかしながら近年，優れた解析プログラムが容易に利用可能となり，今回の開発に際しては，開発段階でこれら解析プログラムを駆使し，種々のシミュレーションを行い，課題解決の見通しを短期間のうちに得ることができた。以下にこれら課題解決のために考案された多くの改善・工夫を盛り込み，その効果を確認すべく製作される120MVAの試作実験機の概要と，今回の開発で実施された主要な解析の概要を紹介する。

2 120MVA試作実験機

120MVA試作実験機の仕様は次のとおりである。

(1) 出　力：120MVA
(2) 電　圧：11.4kV
(3) 力　率：0.8（遅れ）
(4) 回転速度：3,600r/min

試作実験機の構造計画図を**図1**に示す。この試作実験機の特徴は，固定子鉄心外径の低減，空気冷却器の固定子鉄心下部への配置などの多くの改善・工夫により小形・軽量化を図り，かつメンテナンスを容易にしていることにある。

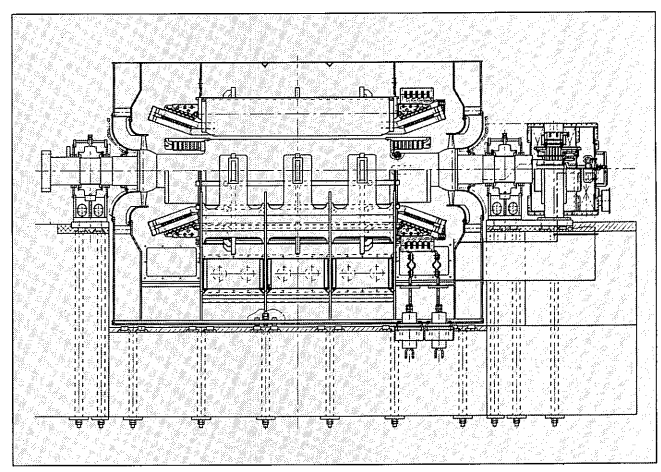
また，この試作実験機では，種々の試験条件のもとに500点に及ぶ測定を行い，新しい発電機の性能，安全性，メンテナンス性および各種改善項目の効果を確認すると同時に，絶縁診断に関するデータをはじめ，将来の改善の源となる多くのデータを取得する計画である。

3 電磁界解析

回転電気機械の利用率を上げ小形化を図った場合，各部位で発生する損失密度も同時に増大する。したがって，機械の小形化，高出力化を実現するには，冷却技術の向上とともに，これら発生損失を正確に把握することが重要である。

そこで，新系列の空冷機開発にあたり，発電機で発生する電磁気的な損失を有限要素法を用いて解析した。解析対象モデルは前述の試作実験機とし，以下に示す項目につい

図1　試作実験機の構造計画図

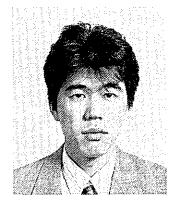


佐藤　昭二

中・大形回転機に関する基礎技術開発および新製品開発に従事。現在，(株)富士電機総合研究所回転機技術開発研究所主席研究員。

溝上　良一

大形回転機の設計・開発に従事。現在，電力事業本部エネルギー製作所回転機部。



山﨑　勝

大形回転機の構造設計および開発に従事。現在，(株)富士電機総合研究所回転機技術開発研究所大形回転機開発グループ。

て計算を行った。

(1) 固定子鉄心端歯部への漏込み磁束による渦電流損失
(2) プレスリング部での渦電流損失
(3) 固定子フレームへの漏込み磁束による渦電流損失
(4) 巻線ピッチに起因する高調波磁束による渦電流損失
(5) レーベル転移固定子巻線内部の電流分布
(6) スロットリプルによる回転子表面損失

今回はこのなかから固定子鉄心端歯部とプレスリング部の渦電流損失計算について以下に紹介する。

3.1 固定子鉄心端歯部の渦電流解析

図2に解析モデルのメッシュ図を示す。このモデルの節点数は約17万，要素数は約16万であり，周方向は周期性から1/2領域を，軸方向は鉄心端から6ブロックまでをモデル化している。

このモデルにて，①100％出力（1.00力率），②100％出力（0.95進み力率），③三相短絡（100％電流），④無負荷（100％電圧），⑤無負荷（120％電圧），の五つの状態の静解析を行った。**図3**に②の運転状態での固定子，回転子鉄心部の磁束密度分布を，**図4**にそれぞれの負荷状態での鉄心端歯部表面へ漏れ込む磁束垂直成分の分布を示す。

図4から分かるように，今回計算したなかでは運転状態②の場合が磁束の漏込み量が最も大きく，したがって，渦電流損失も大きい。

次に最も渦電流損失が大きい運転状態②について，鉄心歯部の局部モデルを作成し，過渡解析にて渦電流損失を求めた。ただし，与える起磁力としては，先の静解析で得られた鉄心端歯部表面の起磁力分布と同一な起磁力で，かつ，それを正弦波状に変化させたものである。

図5に渦電流分布を示す。この結果，鉄心端歯部での渦電流損失密度は約0.3 W/cm^{3}となり，鉄心中央の軸方向の漏込み磁束がない場合の損失に対して10倍程度の損失密度になることが確認された。

3.2 プレスリング部の渦電流解析

この解析では，**図6**に示すようなコイルエンド形状の違いがプレスリング部に発生する渦電流損失にどの程度影響

図2　発電機解析モデルメッシュ図

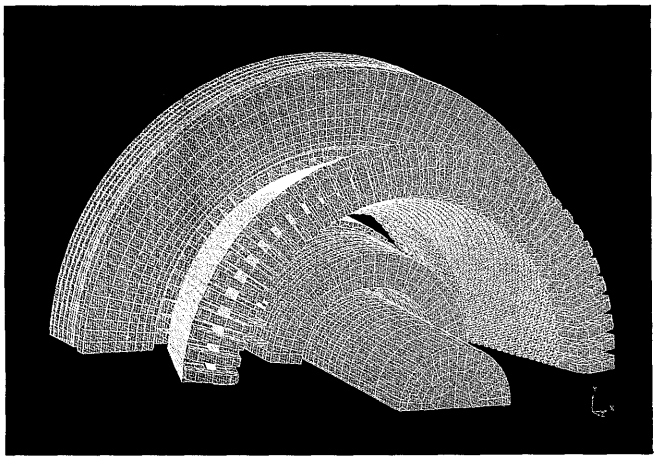


図3　固定子鉄心および回転子鉄心での磁束

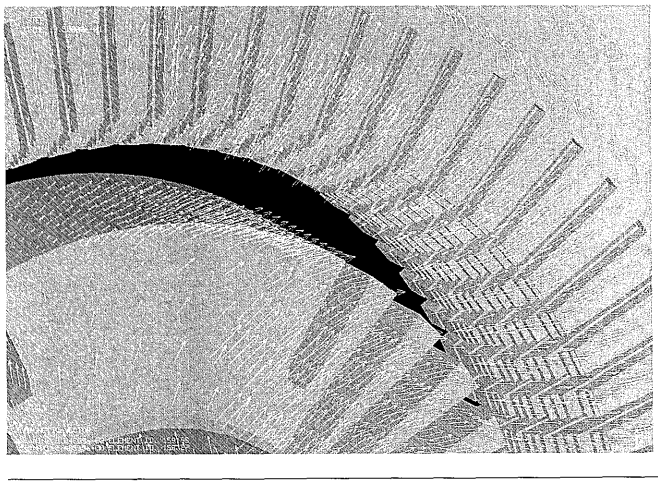


図4　鉄心端歯部表面の垂直磁束分布

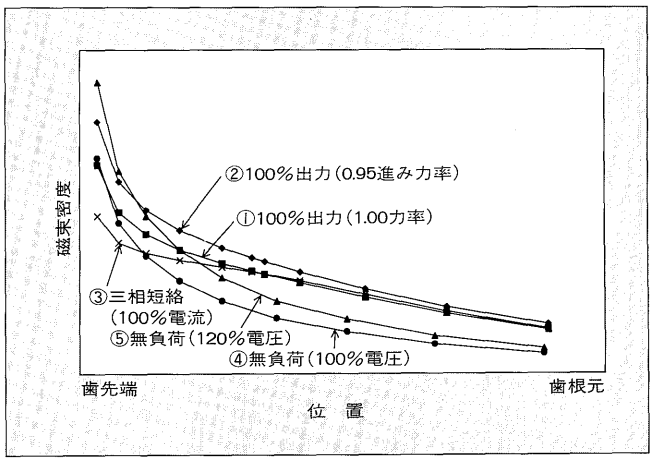


図5　鉄心端歯部の渦電流分布

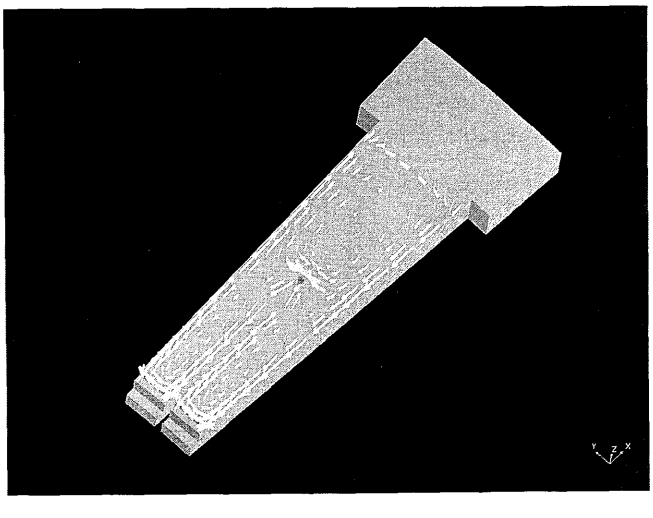


図6　コイルエンド形状

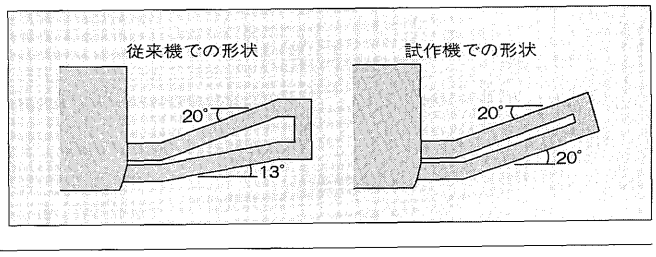


図7　プレスリング部の渦電流解析モデルメッシュ図

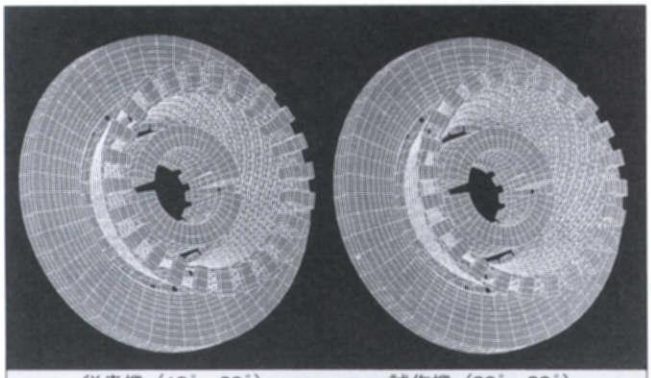
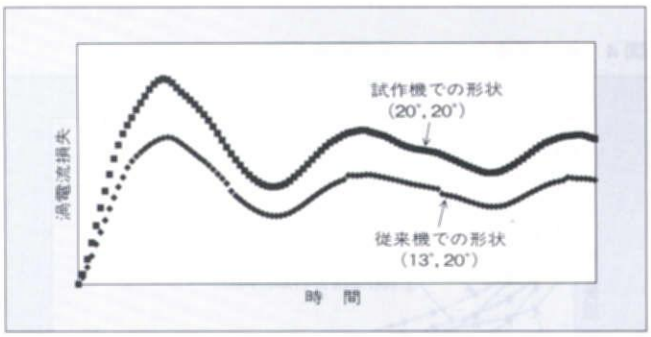


図8　プレスリング部の渦電流損失



するかを求めた。

図7に解析モデルのメッシュ図を示す。この解析では計算時間短縮のため，固定子および回転子コイルの本数を低減し，大幅な簡略化を行った。計算した運転状態は100％出力（0.95進み力率）時のものであり，固定子・回転子巻線にはこれと等価な起磁力を与えた。なお，巻線数を減らした簡略化については，先の歯部損失解析での全体モデルの磁束分布と比較して差異がないことを確認している。

図8にそれぞれのコイルエンド形状時の渦電流損失波形を示す。この図から，コイルエンド形状を従来機から試作機のように変更することで損失が約4割増加することが確認された。

4　通風冷却解析

通風冷却の主眼は発電機内の風量分布の最適化および熱伝達の改善・強化にある。このための解析手法として，発電機の通風および温度特性を表す等価通風回路および熱回路を，ある仮定の基に作成し，これを解くという方法が一般に採用されている。

しかし近年，流れ場を直接解くことのできる三次元流れ解析プログラムが開発され，多くの分野でその有用性が報告されている。この流れ解析プログラムを発電機の流れ解析に適用することの長所は，風量分布はもとより，風の流れの様子および熱伝達係数の分布を詳細に把握でき，これにより通風構造の適否を的確に判断できることにある。このことは発電機を新しく開発する場合にはきわめて有用である。

図9　回転子通風ダクトの風速分布

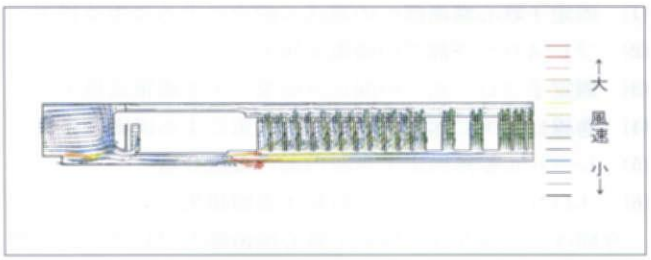


図10　回転子通風ダクトの温度分布

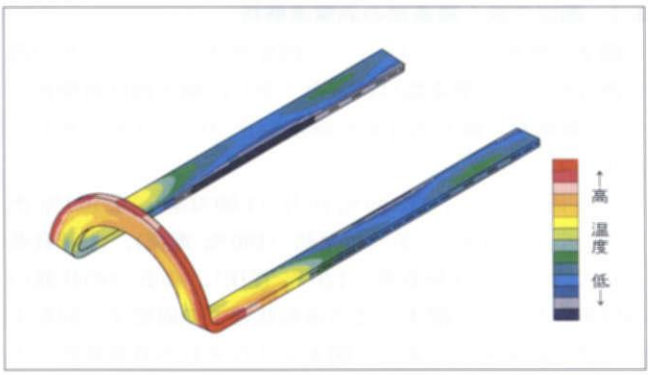
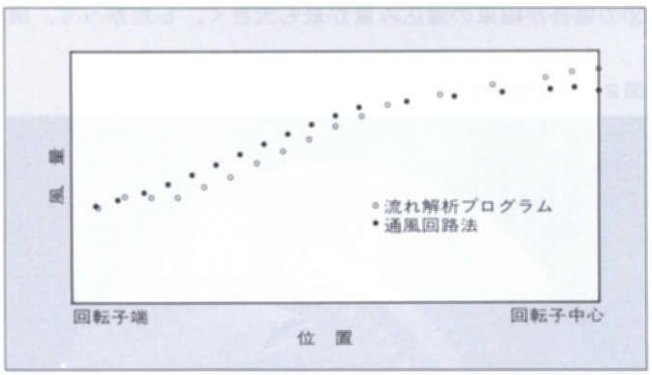


図11　回転子通風ダクトの風量分布計算値の比較



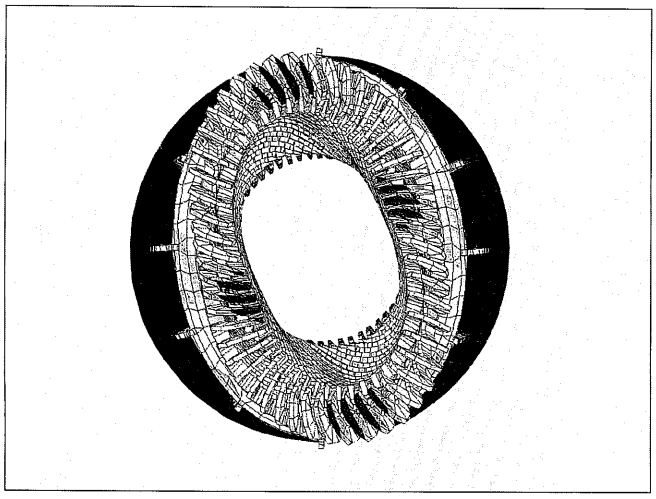
今回の新空冷機の開発にあたっては，この三次元流れ解析プログラムを，①固定子・回転子巻線の通風および温度解析，②ファン周辺の流れ解析，③発電機全体の流れおよび温度解析，に適用し，通風構造の最適化を図った。

固定子巻線に関する解析では固定子鉄心通風ダクトの配置の見直しが主課題であり，回転子巻線に関する解析では軸のスロット部における通風ダクトの形状および配置，コイルエンド部の通風強化が課題である。

ファン周辺の流れ解析の狙いはファン前後の構造の通風特性に与える影響を把握し，それを改善することにある。また発電機全体の流れ解析では，①発電機各部の風量分布の把握，②風量分布の従来計算法による計算値との比較検討，③発電機の局部過熱の懸念のある部位における熱伝達率の算出，が主眼である。

解析例として回転子巻線の現状通風構造に対する，風速および温度の分布を**図9**および**図10**に示す。また**図11**に回転子巻線の各通風ダクトの風量分布を，流れ解析プログラ

図12　固定子コイルエンドの固有振動モード（4節モード）



ムによるものと，通風モデル実験結果を基に作成され，現在使用されているプログラムによるものを比較して示す。両者はよく一致しており，図示はしていないが，熱伝達率の大きさおよび分布も想定されるものと合致することから，この流れ解析プログラムは十分使用可能であることが確認された。

5　振動解析

振動解析で今回の新空冷機の開発において特に注目している項目は次の二つである。

(1)　固定子コイルエンドの振動解析

(2)　固定子電磁振動の，固定子枠に伝達される振動の低減

固定子コイルエンドには突発短絡時に非常に大きな電磁力が作用する。この電磁力によりコイルが損傷せぬよう，コイルエンドを強固に支持する必要がある。また通常運転時では，コイルエンドが電磁力と共振するのを避けねばならない。

一方，コイルエンドの支持を過剰に強固に行えばコストアップを招く。したがってコイルエンドの支持構造を適正なものとすることが，新空冷機開発時の課題となる。この課題解決のために有限要素法により振動解析を行い，支持構造の適正化を図った。解析結果の一例として，**図12**にコイルエンドの最も危険な4節の固有振動モードを示す。

また，タービン発電機の小形化の解決策の一つとして，固定子鉄心外径の低減が挙げられる。しかしこれは固定子の電磁振動の増大を招く。したがって，この解決策の実現の鍵（かぎ）は電磁振動の外部への伝達を低減することにある。このために固定子は一般に弾性支持されるが，富士電機では板ばね支持構造を採用している。この支持構造に対し有限要素法による振動および強度解析を行い，支持構造の弾性定数と強度の調和をとり，板ばね支持構造の最適化を図った。

以上の改善された支持構造の適否を判断すべく，試作実験機にて100％電圧突発短絡試験をはじめ，種々の試験を行い，固定子鉄心，固定子コイルエンドなどの各部にて多数の振動測定を行う。かつまたこれらの測定により新支持構造の性能を確認すると同時に，解析値との比較検討により振動解析精度の向上をめざす。

6　強度解析

発電機の小形化の狙いの一つは，回転子外径を低減することにより，高価な回転子軸および回転子コイルエンドを保持する保持リングの質量を低減し，コストを低減することにある。しかし回転部の小形化は遠心力による応力の増大を招くことから，慎重な対応が必要となる。このために回転子の強度で最も問題となる，回転子軸の軸端，保持リングおよび保持リング支えからなる部分を，有限要素法により詳細に検討し，安全性を確認した。

7　あとがき

初期投資額が少なく，メンテナンスが容易な空冷機の需要は今後ますます増大すると考えられる。この空冷機の特長をさらに推し進め，小形・軽量で，かつメンテナンス性に優れた空冷機を開発中である。この新空冷機の開発に際しては，優れた解析プログラムを使用し，大幅な体格縮小という初期の目標を，短期間のうちに達成し得る見通しを得た。これはまさに近年の解析プログラムの進歩によるものであり，今後もさらなる進歩を望むとともに，このように優れた解析プログラムの利用技術を磨き，これを大いに利用し，市場要求にこたえたいと思う。

参考文献

(1)　矢郷昌三ほか：タービン発電機の技術進歩，富士時報，Vol.65, No.11, p.719-724 (1992)

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。